

对流层大气波导

康士峰 张玉生 王红光 编著



科学出版社

国家自然科学基金、国防科技重点实验室联合资助

对流层大气波导

Atmospheric Duct in Troposphere Environment

康士峰 张玉生 王红光 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

对流层大气波导是对流层低层大气环境中存在的一种特殊电波传播超折射现象。本书面向实际应用,全面介绍了国内外大气波导研究与应用状况,重点分析了对流层大气波导的形成与变化机理、大气波导的特征与探测方法、大气波导的预测与预报方法,以及大气波导的超视距传播效应。基于海洋大气边界层海—气耦合相似性理论,介绍了蒸发波导的预测模型;基于大气动力学研究方法,分析了表面波导和悬空波导等低空波导的形成机理;基于 MM5 或 WRF 数值预报模式,给出了大气波导的区域模拟和预报方法;基于射线跟踪技术和抛物方程数值算法,分析了大气波导超视距传播特性,同时还介绍了对流层大气波导在雷达和通信等领域中的应用。

本书可作为高等院校相关专业本科生、研究生的参考书,也可供相关领域的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

对流层大气波导 / 康士峰, 张玉生, 王红光编著. —北京: 科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-042257-6

I. ①对… II. ①康…②张…③王… III. ①对流层—大气波导传播 IV. ①P421.31②TN011.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 245654 号

责任编辑: 王 哲 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 11 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2014 年 11 月第一次印刷 印张: 16 插页: 10

字数: 316 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

电波环境是复杂电磁环境的重要组成部分，在现代高科技信息化社会和信息化装备发展中起着越来越突出的作用。对流层环境千变万化，是人类生存和活动的主要空间。同时，作为电波环境的低层空间，对流层环境通过对无线电波产生吸收衰减、大气折射、湍流散射、信号闪烁等效应，也直接影响着无线电信息系统的性能。

对流层大气波导是对流层环境中的一种特殊大气现象，通过对一定条件下的无线电波形成超折射波导传播，可以实现超视距目标探测和远距离通信，扩大无线电信息系统的作用距离或覆盖范围，也可以改变正常电波传播路径，产生探测空洞或通信盲区等影响。因此，对流层大气波导具有重要的应用价值，受到科研人员和应用部门的重视，特别是在海洋环境中，大气波导尤其是蒸发波导因普遍存在和可利用率高而受到更多的关注。数十年来，国内外对大气波导的研究范围十分广泛，包括大气波导产生机理的理论和实验研究、大气波导观测数据统计分析、大气波导探测和反演技术研究、大气波导预测预报模型和数值算法研究、大气波导超视距影响或效应的应用和评估方法等，形成了一些极有价值的研究成果，但是由于影响对流层环境的因素很多，大气状态变化十分复杂，大气波导研究涉及气象学、海洋学、遥感学、信号处理、电波传播等诸多学科领域，是一项跨学科、交叉学科和边缘学科的研究课题，掌握大气波导的特性和规律并做出准确的预测预报和效应评估仍然是比较困难的工作。虽然国内外学者在该领域发表了许多文章，但尚缺乏全面、详细地介绍大气波导知识和成果的专著。近年来，中国电波传播研究所康士峰博士及其大气波导研究团队在有关课题的支持下，紧密围绕大气波导的应用需求开展了大量基础性、系统性研究工作，并取得了显著的成绩。本书是在参考国内外相关文献资料、总结作者及其团队多年来研究成果的基础上形成的，全面介绍了对流层大气波导的国内外发展动态、大气波导的形成与变化机理、大气波导的预测预报方法和大气波导超视距传播特性，对海洋大气边界层中蒸发波导的海-气耦合相似性理论、低空波导的大气动力学分析方法、大气波导的区域数值预报方法、大气波导超视距传播技术及其应用等进行了系统性论述，涉及面广并具有很强的实用性，可以供相关领域科研人员和技术应用部门参考。

相信本书的出版将会对我国对流层大气波导技术的研究与应用起到较大的指导和推动作用。

张明高

中国工程院院士

2014年8月

前 言

人类生存在由陆地、海洋和大气组成的地球空间环境中。陆地让人类脚踏实地、繁衍生息，海洋让人类逐浪远航、磨炼意志，大气让人类自由呼吸、翱翔蓝天。跨入信息化时代，在人类已经到达、可能到达或似乎永远无法到达的广袤的宇宙空间环境中，无线电信息传播无处不在、无时不有。电波环境是指无线电信息传播的所有空间环境，作为复杂电磁环境的重要组成部分，对电波产生吸收、折射、散射、闪烁、色散、极化和反常传播等效应，直接影响信息化系统的作用距离、探测概率、通信容量和指标精度等性能，因此，电波环境信息是无线电信息化系统研制并发挥最佳效能的重要保障，需要重视和加强复杂电波环境的机理、感知、预报、评估和应用研究。

本书所讨论的内容是与大气和海洋环境密切相关并严重影响电波传播的对流层大气波导问题。作为电波环境的重要类别，大气波导是在对流层内特别是在对流层大气边界层内形成的一种可以实现电磁波超视距远距离传播的特殊超折射大气层状结构，利用它可实现超短波、微波频段的超视距探测和通信等应用。大气波导作为一种特殊的气象现象，其形成和变化同低层大气与地/海面环境的相互作用，以及气象条件或天气形势变化密切相关，人们对大气波导的发生和变化机理还缺乏深层次的了解，对大气波导的预测、预报能力还很不足，制约了超短波、微波超视距系统的应用和性能的有效发挥，因此，开展大气波导形成机理与预测方法、超视距传播数值算法和系统效能评估的研究，提高大气波导的感知和预报能力，对提升超短波、微波超视距系统的性能和应用能力具有重要价值。

大气波导的研究与应用涉及气象学、海洋学、遥感学、电磁波理论与技术等多个专业研究领域，属于交叉和边缘学科，国外特别是西方发达国家已开展了数十年的研究并取得了显著的理论与应用成果。我国对大气波导特性的研究起步较晚，基础性条件投入不够，特别是大气波导专题探测资料稀少，虽然国内目前开展大气波导研究与应用的单位越来越多，但比较分散且缺乏系统性和深入性的工作，也没有公开的学术专著对大气波导进行全面介绍，影响了研究成果的技术转化和推广应用。中国电波传播研究所建所 50 年来一直致力于无线电气象学研究，对复杂大气环境中的电波传播特性进行基础性与探索性研究，在大气波导领域已开展数十年的跟踪、实验、理论分析和推广应用工作，为了满足国内众多单位和部门在学术交流和成果应用中对全面、系统性大气波导参考资料的需求，本书由电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室康士峰研究员主笔，参考国内外公开发表的大量研究文献并基于作者和课题组多年来

的研究成果,归纳整理并总结论述了大气波导的探测方法、大气波导的预测与预报方法、大气波导的超视距传播分析方法,重点对蒸发波导的海-气耦合相似性理论、表面波导和悬空波导的大气动力学理论及其传播特性数值分析方法等进行了介绍,同时也介绍了对流层大气波导超视距效应在雷达和通信等领域中的应用。第1章详细介绍国内外大气波导研究与应用的基本状况;第2章分析对流层大气边界层特点、相似性理论和无线电气象学基础;第3章介绍大气波导的概念与特点、获取或监测大气波导参数的探测技术与方法;第4章详细阐述大气波导的机理和分析预测模型;第5章介绍大气波导数值模拟与预报方法;第6章对大气波导超短波、微波超视距传播的分析和应用技术进行介绍;第7章对大气波导的研究与应用进行分析总结和展望。在附录中还简要介绍美国研制的高级折射效应预测系统和中国电波传播研究所自主研制的舰载大气波导监测与应用系统,供读者参考。

本书从编撰到出版历经数年时间,凝聚了作者大量心血,也受到众多领导、专家和同行的肯定与鼓励。作者在此真诚感谢中国电波传播研究所吴健所长、刘小国书记、咨审委常务主任兼科技委主任董庆生研究员、杨志强副所长、孟宪礼副总、朱希夏副总等领导和专家长期以来对大气波导研究与应用关心与支持;十分感谢重点实验室学术委员会主任焦培南研究员、常务副主任及中国电子科技集团公司首席专家赵振维研究员审阅本书并提出许多有益的建议。感谢共同工作或协作交流并为本书提供文献资料的课题组同事与国内外同行,他们是林乐科研究员、刘玉梅高工、蔺发军高工、李建儒高工、程显海高工、孙方高工、马征征高工、韩杰硕士、郭相明硕士、张守宝硕士、郝晓静硕士、曹仲晴硕士、王海斌硕士等;曾在实验室学习和工作的成印河博士和王波博士;曾与作者一起工作的武汉理工大学刘成国教授;西安电子科技大学吴振森教授;中国海洋大学高山红博士;国家海洋环境预报中心王彰贵研究员、陈莉博士;南京信息工程大学王振会教授;中国气象局王喆硕士;海军某试验基地李文才处长、王玉国高工、赵中军高工、范建业硕士;北京应用气象研究所戴福山博士、海军工程大学察豪教授、大连舰艇学院王继光教授;乌克兰科学院无线电物理与电子学研究所 Kivva 院士、Ivanov 教授、Shalyapin 博士等。感谢国家自然科学基金面上项目(41175012)、青年科学基金项目(41205024)和国防科技重点实验室的大力支持;感谢科学出版社对本专业领域的关注并精心策划、编辑,使本书尽快与读者见面。最后,还要特别感谢中国工程院院士张明高研究员长期以来对作者工作和生活的关心与指导并在百忙之中为本书作序。

由于作者水平有限,书中难免出现疏漏与不足之处,希望读者批评指正。

作者

2014年8月于青岛

中英文关键词和缩略语对照表

对流层	troposphere
大气波导	atmospheric duct
表面波导(无基础层)	surface duct
表面波导(有基础层)	surface-based duct
蒸发波导	evaporation duct
悬空(抬升)波导	elevated duct
预测	prediction
预报	forecast
诊断	diagnosis
评估	assessment
海陆风	sea-land breeze
海表温度	Sea Surface Temperature, SST
气-海温差	Air-Sea Temperature Difference, ASTD
大气边界层	Atmospheric Boundary Layer, ABL
大气边界层动力学	dynamics of atmospheric boundary layer
中尺度大气动力学	mesoscale atmospheric dynamics
莫尼-奥布霍夫相似性理论	Monin-Obukhov similiary theory
P-J 模型	Paulus-Jeske model
热带海洋和全球大气研究计划	Tropical Ocean and Global Atmosphere Program, TOGA
海-气耦合响应实验	Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment, COARE
全球海洋观测系统-东北亚区域	The North-East Asian Regional-Global Ocean Observing System, NEAR-GOOS
地转海洋学实时观测阵	Array for Real-time Geostrophic Oceanography, ARGO
数值天气预测	Numerical Weather Prediction, NWP
第 5 代中尺度气象模式	Mesoscale Model 5, MM5
气象研究与预报模式	Weather Research and Forecasting Model, WRF
数字地形高程数据	Digital Terrain Elevation Data, DTED
无线电几何光学	Radio Geometry Optical, RGO
无线电物理光学	Radio Physics Optical, RPO
抛物方程	Parabolic Equation, PE
分步傅里叶变换	Split-Step Fourier Transform, SSFT
对流层电磁抛物方程程序	Troposphere Electromagnetic Parabolic Equation Routine, TEMPER
高级传播模型	Advanced Propagation Model, APM
对流层折射效应预测系统	Troposphere Refractive Effects Prediction System, TREPS
工程师折射效应预测系统	Engineer's Refractive Effects Prediction System, EREPS
集成折射效应预测系统	Integrated Refractive Effects Prediction System, IREPS

高级折射效应预测系统	Advanced Refractive Effects Prediction System, AREPS
海-气耦合中尺度预测系统	Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System, COAMPS
海军业务区域大气预测系统	Navy Operational Regional Atmospheric Prediction System, NORAPS
海军业务全球大气预测系统	Navy Operational Global Atmospheric Prediction System, NOGAPS
高级微波探测单元	Advanced Microwave Sounding Unit, AMSU
大气剖面探测激光雷达	Lidar Atmospheric Profile Sensor, LAPS
微波超视距雷达	Microwave Over-The-Horizon (Transhorizon) Radar, MOTHRR
雷达散射截面	Radar Cross Section, RCS
电子监视措施	Electronic Surveillance Measures, ESM
协调世界时	Universal Time Coordinated, UTC
国际电信联盟	International Telecommunication Union, ITU
世界气象组织	World Meteorological Organization, WMO
北大西洋公约组织	North Atlantic Treaty Organization, NATO
国家海洋和大气管理局	National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA
国家图像测绘局	National Imagery and Mapping Agency, NIMA
国家地理空间情报局	National Geospatial-intelligence Agency, NSA
联邦航空局	Federal Aviation Administration, FAA
空军气象局	Air Force Weather Agency, AFWA
日本气象厅	Japan Meteorological Agency, JMA
海军研究生院	Naval Postgraduate School, NPS
国防建模与仿真办公室	Defense Modeling and Simulation Office, DMSO
海军建模与仿真管理办公室	Navy Modeling and Simulation Management Office, NAVMSMO
海军环境预测机构	Naval Environmental Prediction Research Facility, NEPRF
地球系统研究实验室	Earth System Research Laboratory, ESRL
海军研究实验室	Navy Research Laboratory, NRL
国家环境预测中心	National Centers for Environmental Prediction, NCEP
国家大气研究中心	National Center for Atmospheric Research, NCAR
国家冰雪数据中心	National Snow and Ice Data Center, NSIDC
空间和海军电子战系统中心	Space and Naval Warfare Systems Center, SPAWAR
海军电子实验室中心	Navy Electronics Laboratory Center, NELC
海军太平洋导弹试验中心	Navy Pacific Missile Test Center, NPMTC
舰队数值气象和海洋学中心	Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center, FNMOC
风暴分析和预测中心	Center for Analysis and Prediction of Storms, CAPS
欧洲中尺度天气预报中心	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF
伍兹霍尔海洋研究所	Wood Hole Oceanographic Institution, WHOI
乌克兰科学院无线电物理与电子学研究所	O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, IRE NASU

符 号 表

(通用符号不标章号, 在某些章中同一符号有其他含义者, 用括号标出章号)

A	BYC 蒸发波导模型中定义的参数, 大气折射率微分式中的变量(4), 热功当量常数(5), 传播因子或衰减因子(6), 归一化常数(6)
A_d	直接射线分量
A_r	反射射线分量
A_h	稳定条件下温度普适函数中的参数
A_m	稳定条件下风速普适函数中的参数
A_N	折射率公式中定义的常数
B	BYC 蒸发波导模型中定义的参数, 大气折射率微分式中的变量(4), 谱密度或功率谱中定义的参数(6), 天线波束方向图函数(6)
B_h	不稳定条件下温度普适函数中的参数
B_m	不稳定条件下风速普适函数中的参数
B_N	折射率公式中定义的常数
B_1	P-J 模型中定义的参数
B_2	P-J 模型中定义的参数
B_3	P-J 模型中定义的参数
C	BYC 模型中的参数, 大气折射率微分式中的变量(4)
C_d	湍流动量总体热输送系数
C_e	湍流潜热总体热输送系数
C_h	湍流感热总体热输送系数
C_n^2	折射率结构常数
C_1	COARE3.0 稳定性函数定义中的参数
D	圆柱形谐振腔长度
E	蒸发波导机理模型中定义的参数, 电场强度(6)
E_0	自由空间场强
E_y	y 方向电场场强
E_r	球坐标下的电场强度分量
E_θ	球坐标下的电场强度分量
E_φ	球坐标下的电场强度分量
F	蒸发波导预测模型中定义的参数, 传播因子或衰减因子, 凝结常数(5), 傅里叶变换(6)
F_d	直接射线分量
F_r	反射射线分量
F^{-1}	傅里叶逆变换
F_{ij}	区域气象要素场, 代表第 i 个场中的第 j 观测值
G	雷达天线增益

G_r	接收天线增益
G_t	发射天线增益
H	磁场强度, 雷达天线高度(6)
H_0	雷达天线优化高度
H_1	潜热通量
$H_{\max}$	雷达探测区域最大高度
$H_{\min}$	雷达探测区域最小高度
H_s	感热通量
H_y	y 方向磁场强度
H_r	球坐标下的磁场强度分量
H_θ	球坐标下的磁场强度分量
H_φ	球坐标下的磁场强度分量
K	等效地球半径因子, 格点(5)
K_h	湍流热量交换系数
K_m	湍流动量交换系数
K_q	湍流水汽交换系数
L	Monin-Obukhov 相似长度, 雷达波段名称
L_e	相变潜热或蒸发潜热
L_z	湍流外尺度在垂直方向上的分量
$L_{//}$	湍流外尺度在水平方向上的分量
L_{bf}	自由空间基本传播损耗
L_p	路径损耗
L_s	系统损耗
L_w	考虑湿度订正的 Monin-Obukhov 长度
L_T	热力学温度定义下的 Monin-Obukhov 长度
L_0	与流动有关的特征尺度, 湍流外尺度(6)
M	大气修正折射率
N	大气折射率, 观测站数(5)
N_p	P-J 模型中定义的位折射率, 伪折射率蒸发波导模型中定义的伪折射率
N_0	地面折射率
N_1	离地 1km 处折射率, 高度单元数(6)
N_2	距离单元数
N_9	海拔 9km 处折射率
N_{p^*}	伪折射率蒸发波导模型中定义的折射率特征参数
P	位涡
P_c	模拟的杂波功率
P_c^{obs}	随距离变化的杂波功率
P_d	雷达目标检测概率
P_t	天线发射功率
P_r	天线接收功率

P_M	湿位涡
Q	伪微分算子
$\hat{Q}$	单位质量加热率
R	圆柱形谐振腔半径, 气体常数(5), 扫描半径(5), 反射系数(6), 雷达到目标的距离(6)
R_a	干气体常数
R_e	雷诺数
R_h	大气相对湿度
Ri_b	块体理查森数
Ri_{bc}	饱和理查森数
R_{max}	雷达最大探测距离
R_{min}	雷达最小探测距离
R_v	水汽气体常数
R_0	光滑表面反射系数
S	一维折射指数谱函数, 风速(4)
S_{min}	雷达最小可检测信号功率
S_{Np}	P-J 模型中定义的位折射率垂直通量
S_0	MGB 蒸发波导模型中定义的参数
S_q	水汽的源和汇
T	热力学温度, 周期(2)
T'	温度脉动值
T_d	干绝热递减率
T_v	虚温
$\overline{T_v}$	平均虚温
T'_v	虚温脉动值
T_{v*}	虚温特征尺度
T_z	高度 z 处的空气热力学温度
T_0	海表温度
T_1	伪折射率模型中定义的测量高度处的空气温度
T_*	特征温度或摩擦温度
U	衰减函数 u 的傅里叶变换
W	粗糙面的谱密度或功率谱
W_*	特征对流速度
Z_0	波阻抗
ΔZ_s	数据同化中定义的测站的订正值(观测增量)
Z_s^{ab}	数据同化中定义的测站观测值
Z_s^G	数据同化中定义的测站的预备场值
V_z	高度 z 处的风速
F	均值为 0 的气象资料矩阵
T	EOF 分解中时间函数阵
V	EOF 分解中空间函数阵
v_k	EOF 分解中空间函数阵中对应的第 k 个向量

v_l	EOF 分解中空间函数阵中对应的第 l 个向量
y_k	EOF 分解中时间函数阵中对应的第 k 个向量
y_l	EOF 分解中时间函数阵中对应的第 l 个向量
V	三维风速矢量
F	摩擦力矢量
b_c	P-J 蒸发波导模型中定义的临界折射率梯度值
c	光速, 水汽压和混合比的比值(4)
c_{el}	地面以上 1km 至海拔 9km 的指数衰减率
c_{e9}	海拔 9~60km 的指数衰减率
c_p	空气比定压热容
c_{pa}	湿空气比定压热容
c_v	比定容热容
c_1	MGB 模型中定义的参数 1
c_2	MGB 模型中定义的参数 2
c_3	MGB 模型中定义的参数 3
d	COARE3.0 中温度和风速的稳定度修正函数中的参数
d_0	无线电视距
d_h	波导厚度
e	水汽压
e_0	伪折射率模型中定义的海表处的水汽压
e_1	伪折射率模型中定义的测量高度处的水汽压
e_p	位水汽压
e_*	水汽特征量
f	科氏参数或地转参数, 目标函数(3), 频率(6)
f_d	直射射线的天线方向图因子
f_r	反射射线的天线方向图因子
f_0	真空中腔体谐振频率
g	重力加速度, 线性变化率(6), 修正折射率梯度(6), 优化权值(6)
h	海拔高度
h_b	波导层底高度
h_{cl}	波导底高
h_t	波导层顶高度, 蒸发波导高度(3), 发射天线高度(6)
h_r	接收天线高度
h_0	地面海拔高度
k	波数
k_z	垂直方向上的湍流波数
m	修正折射指数
m_1	无基础层表面波导陷获层修正折射率斜率, 高度 h_1 处修正折射指数(6)
m_2	表面波导或悬空波导基础层修正折射率斜率, 高度 h_2 处修正折射指数(6)
m_3	表面波导或悬空波导陷获层修正折射率斜率
m_4	大气波导上层大气(过渡层)修正折射率斜率

n	折射指数
n_f	大气折射率随机扰动量
p	大气压, 谱变量(6)
$\bar{p}$	气压平均值
p'	气压脉动值
q	比湿, 谱密度或功率谱 W 定义中的参数(6)
$\bar{q}$	平均比湿
q'	比湿脉动值
q_s	海表饱和比湿
q_0	海表比湿
q_1	伪折射率模型中定义的测量高度处的空气比湿
$\overline{q_{z_0}}$	MRF 边界层方案中定义的粗糙高度上的比湿值
$\overline{q_G}$	MRF 边界层方案中定义的地面处的比湿值
q_z	高度 z 处的比湿
q_*	特征湿度或摩擦湿度
r	接收点与发射点之间的距离(6), 球坐标中圆点到空间某点的距离(6), $0 \sim 1$ 的正态分布随机数(6)
r_1	发射点至地面反射点的距离
r_2	地面反射点至接收点的距离
r_e	地球半径
u	风速, x 方向风速(2), 衰减函数(6)
u_0	海面风速
u_{fs}	自由空间中孔径场
u_g	x 方向地转风速
$\bar{u}$	平均风速, x 方向平均风速(2)
u'	风速脉动, x 方向风速脉动值(2)
$\overline{u_i}$	风速张量的平均值, $i=1,2,3$
$\overline{u_j}$	风速张量的平均值, $j=1,2,3$
u'_i	风速脉动张量值, $i=1,2,3$
u'_j	风速脉动张量值, $j=1,2,3$
u_*	摩擦速度
v	传播速度, 黏性系数(2), y 方向风速(2), 分段线形地形模型中定义的函数(6), 全局变换函数(6)
v_g	y 方向地转风速
v_θ	分子热扩散系数
$\bar{v}$	平均风速, y 方向平均风速(2)
v'	y 方向风速脉动值
w	垂直风速
w_g	垂直阵风因子
$\bar{w}$	平均垂直风速
w'	垂直方向风速脉动值

x	水汽计算公式中定义的参数
x_j	物理量 x 的张量形式, 用 $x_j(j=1,2,3)$ 表示 (x,y,z)
z	高度坐标变量
z_{pg}	ψ_k 定义中的参数
z_{pt}	ψ_{tk} 定义中的参数
z_{pu}	ψ_{uk} 定义中的参数
z_i	对流边界层高度
z_s	高度参量
z_0	动力粗糙度
z_{0t}	温度粗糙度
z_{0q}	湿度粗糙度
z_{EDH}	蒸发波导高度
α	温度普适函数中的参数, BYC 模型海面粗糙度中的参数 (4), Leontovich 边界条件中的阻抗参数, 地形斜率 (6), 反射面的倾斜角 (6), 大气折射率垂直梯度 (6), 比例系数 (6)
α_s	MGB 模型中蒸发波导高度表达式中的参数
α_u	MGB 模型中蒸发波导高度表达式中的参数
α_1	P-J 模型中定义的稳定大气普适函数中的参数
α_2	P-J 模型中定义的非稳定大气普适函数中的参数
β	阵风因子定义中的经验常数, 射线和反射面的夹角 (6), 波束宽度 (6), 夹角 (6)
ω	角频率
δ	波导层厚度, 分段函数 (5)
$\delta\epsilon(r)$	介电常数随机分量
δ_{ik}	克罗内克张量符号
ϵ_{ijk}	交换张量符号
ρ	空气密度, 粗糙度衰减因子 (6)
ρ_1	粗糙度衰减因子 1
ρ_2	粗糙度衰减因子 2
$\bar{\rho}$	平均空气密度
ρ'	空气密度脉动值
ρ_s	单位体积、单位时间的蒸发量
θ	位温, 擦地角 (6), 相位函数 (6), β 夹角的余角 (6)
θ_e	电波穿透角
θ_e	相当位温
θ_*	特征位温或摩擦位温
θ_0	水平仰角
$\bar{\theta}$	平均位温
θ'	位温脉动值
$\bar{\theta}_{z_0}$	MRF 边界层方案中定义的粗糙高度上的位温值
$\bar{\theta}_G$	MRF 边界层方案中定义的地面处的位温值
θ_v	虚位温

$\bar{\theta}_v$	平均虚位温
θ'_v	虚位温脉动值
ϕ	汉明窗滤波器函数, 反射系数的相位 (6)
$\bar{\phi}$	粗糙面镜反射方向的平均反射场
ϕ_0	平坦表面的镜反射场
ξ	Monin-Obukhov 参数
φ	普适函数, 程函函数 (6)
φ_m	风速普适函数
φ_h	位温普适函数, 球坐标系中水平极化传播抛物方程中定义的参数 (6)
φ_q	湿度普适函数
φ_v	球坐标系中垂直极化传播的抛物方程中定义的参数
φ_N	伪折射率模型中定义的折射率普适函数
ψ	场分量
ψ_m	风速稳定度修正函数
ψ_h	温度稳定度修正函数
ψ_q	湿度稳定度修正函数
ψ_{uk}	BYC 模型和 COARE3.0 中风速稳定度修正函数中的参数
ψ_{tk}	BYC 模型和 COARE3.0 中温度稳定度修正函数中的参数
ψ_k	BYC 模型和 COARE3.0 中稳定度修正函数中的参数
ψ_N	大气稳定度修正函数
Φ_m	目标函数
$\Phi_{\max}$	目标函数最大值
F_j^*	静辐射通量在 j 方向的辐射散度
S_q	为水汽的源和汇导致空气水汽含量的增减
τ	动量通量
τ_0	MRF 边界层方案中定义的近地层湍流常值动量通量
τ_m	时延差
γ_c	MRF 边界层方案中定义的平均情况下的平衡温度梯度
σ	电导率, 垂直坐标系 (5), 目标雷达散射截面 (6)
H	地形追随坐标系
r	位置三维坐标矢量
λ	电磁波波长
λ_H	水平极化波截止波长
λ_v	垂直极化波截止波长
ε	介电常数、气体常数比 (4)
ε_r	相对介电常数
ε'_r	地表复介电常数
ε_0	介电常数慢变化分量
ε_n^2	折射率起伏方差
ω_s	权重因子

κ	卡曼常数, 射线曲率(6)
κ_0	地球曲率
Ω	相位
γ	瑞利粗糙度因子
ζ	粗糙面函数
Γ	P-J 模型中定义的剖面系数
Γ_e	P-J 模型中定义的非中性大气条件下的经验剖面系数
Δf	频率变化量, 相关带宽(6)
ΔH	高度分辨率
ΔM	波导强度
ΔN	大气折射率线性模型中定义的近地面 1km 折射率梯度, 折射率变化量(3)
ΔN_p	位折射率差
ΔN_1	离地 1km 处折射率梯度
ΔR	距离分辨率
ΔS	分辨单元
ΔT	温度差
$(H_z)_0$	MRF 边界层方案中定义的近地层湍流常值热量通量
$(R_z)_0$	MRF 边界层方案中定义的近地层常值水汽通量

作者简介



康士峰 博士，中国电波传播研究所研究员，硕士生导师，电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室副主任，中国电子学会高级会员、遥感遥测遥控分会常务委员、微波分会委员，《无线电工程》和《装备环境工程》期刊编委。长期从事微波通信、移动通信、卫星通信、雷达杂波、微波遥感、大气折射、对流层散射及大气波导等领域的电波环境与传播特性基础理论和应用技术研究，主持或参与国防973、军口 863、国家科技重大专项、国家自然科学基金、国防科技重点实验室基金等多项重点课题。

在国内外学术会议和期刊发表论文百余篇，获得国防科技进步一等奖一项、军队科技进步一等奖一项、集团公司科技进步一、二等奖各一项及三等奖两项、省科技进步二等奖一项，主持或参与制定国军标五项，授权国防专利多项。



张玉生 中国电波传播研究所高级工程师，电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室无线电气象学学术带头人。长期从事无线电气象、微波遥感及对流层大气波导等领域的基础和应用研究，主持或参与国防 973、国家自然科学基金、国防科技重点实验室基金等多项重点课题。在国内外学术会议和期刊发表论文数十篇，获得国防科技进步一等奖一项、集团公司科技进步二、三等奖各一项、省科技进步二等奖一项，授权国防专利一项。